



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

废物资源综合利用技术丛书

WEIKUANG HE FEISHI ZONGHE LIYONG JISHU

尾矿和废石 综合利用技术

杨小聪 郭利杰 等编著

外借



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

❖ 废物资源综合利用技术丛书

WEIKUANG HE FEISHI ZONGHE LIYONG JISHU

尾矿和废石 综合利用技术

杨小聪 郭利杰 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统、全面地介绍了尾矿与废石的分类及其特点,分析了其综合利用价值,提出了尾矿与废石综合利用的途径及相关技术。书中着重介绍了尾矿和废石再选技术、尾矿和废石充填技术、尾矿和废石制备建筑材料及其高附加值利用的技术方法等内容。

本书具有较强的系统性、技术性和应用性,可供尾矿和废石再选、处理装置等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校资源循环科学与工程、环境科学与工程及相关专业的师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

尾矿和废石综合利用技术/杨小聪等编著. —北京:
化学工业出版社, 2018.1

(废物资源综合利用技术丛书)

ISBN 978-7-122-30480-3

I. ①尾… II. ①杨… III. ①尾矿利用-综合利用
②废石-综合利用 IV. ①TD926.4②X751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 206205 号

责任编辑: 刘兴春 卢萌萌

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 王素芹

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 385 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

《废弃物资源综合利用技术丛书》 编委会

主任：岑可法

副主任：刘明华 陈冠益 汪 苹

编委成员（以汉语拼音排序）：

程洁红	冯旭东	高华林	龚林林	郭利杰	黄建辉
蒋自力	金宜英	梁文俊	廖永红	刘 佳	刘以凡
潘 荔	宋 云	王 纯	王志轩	肖 春	杨 帆
杨小聪	张长森	张殿印	张 辉	赵由才	周连碧
周全法	祝怡斌				

《尾矿和废石综合利用技术》 编著人员

编著者：杨小聪 郭利杰 许文远 杨 超 侯国权 李宗楠
史采星 李文臣 刘光生 彭啸鹏 陈鑫政 谢兴山

尾矿，通常指的是在一定的技术条件下，经选矿之后的残留物。残留物中可含有低品位的“有用金属物质”和“围岩”。从广义上讲，尾矿、废石、高炉渣等均可通称为“尾矿”。尾矿和废石因大量占用土地、污染环境、危害生态、危害社会、危害人们的健康而备受人们关注。

据有关数据统计，世界各国每年排出的尾矿量约 5.0×10^9 t，我国矿业固体废渣年排放量达 1.2×10^9 t 以上，累计堆积已达 2.0×10^{10} t，占地 5.5×10^4 hm²，而且随着矿产资源综合利用程度的提高，矿石可采品位的相应降低，尾矿量还会增长。尾矿、废石的大量排放堆积，污染环境、占用土地，每年由此造成的经济损失高达 300 亿元。

本书结合笔者及其团队多年科研项目成果，并参阅国外该领域现代发展，对尾矿和废石资源综合利用的相关技术知识进行了较系统、全面的归纳，并列举了较多的应用实例。

本书为《废物资源综合利用技术丛书》中的一分册。本书紧扣“综合利用”这一科学命题，重点介绍了尾矿和废石综合利用的方法及相关技术，具有以下几方面的特色：①系统介绍了尾矿和废石的分类及其特点，提出综合利用的技术思路；②详细介绍了尾矿和废石再选技术、尾矿和废石充填技术及建筑材料制备技术，以及近年来取得的相关成果；③站在废物综合利用学科发展的前沿，提出了尾矿和废石高附加值利用的相关技术思路，为尾矿和废石的综合开发利用及其矿业领域内多学科交叉指出了创新思路。

全书共分 8 章，第 1 章绪论，主要阐明了废石和尾矿的分类及其特点，综述了我国尾矿和废石资源化利用的基本概况；第 2 章重点介绍了尾矿和废石的基本特性及矿物组成与加工特性；第 3 章重点介绍了尾矿和废石综合利用途径；第 4 章重点介绍了尾矿和废石再选技术及应用实例；第 5 章重点介绍了尾矿和废石充填技术；第 6 章重点介绍了利用尾矿制备建筑材料及应用实例；第 7 章重点介绍了利用废石制备建筑材料及应用实例；第 8 章重点介绍了尾矿和废石高附加值利用及应用实例。

本书内容丰富、逻辑性强、重点突出，具有较高的学术价值和实用性，可供从事尾矿和废石资源综合利用的工程技术人员、科研人员及管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参阅。愿该书的付梓问世能为我国矿山废物的综合开发利用提供借鉴和启迪。本书编写过程中，感谢许文远、杨超、侯国权、李宗楠、史采星、李文臣、刘光生、彭啸鹏、陈鑫政、谢兴山等提供的帮助。

限于编著者水平及编著时间，书中不足和疏漏之处在所难免，敬请读者提出修改建议。

编著者

2017 年 4 月

第 1 章 绪论

1.1 尾矿和废石分类	001
1.1.1 尾矿的分类及特点	001
1.1.2 废石的分类及特点	003
1.2 我国尾矿和废石资源化利用概况	004
1.2.1 尾矿资源化利用概况	004
1.2.2 废石资源化利用概况	006
参考文献	006

第 2 章 尾矿和废石基本特性

2.1 尾矿物理、化学性质	008
2.1.1 尾矿基本物理性质	008
2.1.2 尾矿化学成分	011
2.1.3 尾矿粒级组成	014
2.2 废石物理、化学性质	019
2.2.1 废石基本物理性质	020
2.2.2 废石化学成分	021
2.2.3 废石的力学特性	021
2.2.4 废石粒度组成	022
2.3 尾矿矿物组成及加工特性	023
2.3.1 尾矿中有价金属的回收	024
2.3.2 尾矿在建材中的应用	026
参考文献	029

第 3 章 尾矿和废石综合利用途径

3.1 尾矿综合利用途径	032
3.1.1 尾矿再选	033
3.1.2 尾矿充填	038
3.1.3 尾矿建材	040
3.1.4 高附加值产品	043
3.2 废石综合利用途径	045
3.2.1 废石再选	045
3.2.2 废石充填	047
3.2.3 建筑材料	050

3.2.4 高附加值产品	052
参考文献	054

第4章 尾矿再选技术

4.1 铁尾矿的再选	055
4.1.1 铁尾矿的类型	056
4.1.2 铁尾矿再选技术	056
4.1.3 尾矿再选实例	060
4.2 有色金属尾矿的再选	065
4.2.1 有色金属尾矿再选技术	065
4.2.2 铜尾矿再选实例	075
4.2.3 铅锌尾矿再选实例	077
4.2.4 钨尾矿再选实例	079
4.2.5 锡尾矿再选实例	081
4.3 金矿尾矿的再选	082
4.3.1 金尾矿再选技术	082
4.3.2 从金尾矿中回收铁	083
4.3.3 用炭浆法回收金银	084
4.3.4 从金尾矿中回收硫	085
参考文献	085

第5章 尾矿和废石充填技术

5.1 尾矿充填技术	086
5.1.1 充填物料	086
5.1.2 尾矿基本性能要求	087
5.1.3 尾矿充填工艺流程	089
5.1.4 尾矿浓缩与存储系统	090
5.1.5 充填料浆搅拌系统	094
5.1.6 充填料浆管道输送系统	095
5.1.7 典型尾矿充填实例	096
5.2 废石充填技术	100
5.2.1 废石基本性能要求	101
5.2.2 废石水泥浆自淋胶结充填	101
5.2.3 废石粗骨料泵送胶结充填	102
5.2.4 典型废石充填实例	102
5.3 废石尾砂协同充填技术	102
5.3.1 废石尾砂充填物料基本性能	102
5.3.2 废石尾砂胶结充填工艺	118
5.3.3 典型废石尾砂协同充填实例	133

第6章 利用尾矿制备建筑材料

6.1 国内外利用尾矿制备建筑材料研究概况	135
6.1.1 国外研究概述	135
6.1.2 国内研究概述	136
6.2 金属尾矿应用于水泥制备	137
6.2.1 金属尾矿用于水泥原料制备的可行性分析	137
6.2.2 水泥制备工艺	137
6.2.3 硅酸盐水泥熟料水化性能分析	140
6.2.4 尾矿作水泥生产原料应用分类	144
6.2.5 铜、铅、锌尾矿作为水泥原料制备	146
6.2.6 基于铁尾矿制备的充填新型胶凝材料的应用	147
6.3 尾矿制备新型混凝土材料	156
6.3.1 尾矿制备加气混凝土	156
6.3.2 尾矿制备泡沫混凝土	162
6.4 泡沫充填材料制备	170
6.4.1 尾矿浆体自发泡基本原理	170
6.4.2 尾矿基本物化性质	170
6.4.3 发泡材料	172
6.4.4 泡沫尾砂浆体泌水率试验	175
6.4.5 充填体体积膨胀率测试	176
6.4.6 泡沫尾砂充填体强度试验	177
6.4.7 泡沫尾砂充填料浆流动性试验	180
6.4.8 泡沫尾砂充填体微观结构分析	182
6.4.9 泡沫尾砂充填参数选择	183
6.5 尾矿制砖工艺技术	183
6.5.1 尾矿制砖现状	183
6.5.2 尾矿制备烧结砖工艺与机理	184
6.5.3 尾矿制备免烧砖工艺与机理	185
参考文献.....	186

第7章 利用废石制备建筑材料

7.1 废石生产建筑砂石	187
7.1.1 废石生产人工砂石介绍	187
7.1.2 废石生产人工砂石实例	187
7.2 废石生产水泥原料	191
7.2.1 石灰质原料	192
7.2.2 黏土质原料	194

7.2.3	水泥生产用校正原料	195
7.2.4	燃料	196
7.2.5	低品位原料和工业废渣的利用	197
7.2.6	工艺流程	198
7.2.7	矿山废石和尾矿可以用作水泥及混凝土原料的意义	199
7.3	废石制备高性能混凝土	199
7.3.1	高性能混凝土的历史和由来	200
7.3.2	高性能混凝土的定义	200
7.3.3	高性能混凝土的组成特点	202
7.4	废石制造微晶玻璃	206
7.4.1	废石制造微晶玻璃介绍	206
7.4.2	废石尾矿微晶玻璃的制备工艺	207
7.4.3	国内外废石尾矿制备微晶玻璃的现状	207
7.4.4	废石尾矿制备微晶玻璃实例	208
7.5	其他建材利用	216
7.5.1	利用废石尾砂制备非烧结砖	216
7.5.2	利用废石尾砂制备烧结泡沫材料	217
7.5.3	利用废石尾砂制备墙体材料和道路材料	217
	参考文献	218

第 8 章 尾矿和废石高附加值利用

8.1	尾矿高附加值利用技术	219
8.1.1	高性能耐火材料制备	219
8.1.2	纳米二氧化硅制备	220
8.1.3	硅铝聚合材料制备	221
8.2	废石高附加值利用技术	225
8.2.1	高强度人造石材材料	225
8.2.2	新型地聚物材料	226
8.2.3	建筑工艺石材	227
	参考文献	228

附录

附录一	通用硅酸盐水泥 (GB 175—2007)	229
附录二	铁尾矿砂混凝土应用技术规范 (GB 51032—2014)	235

索引

第 1 章



绪论

1.1 尾矿和废石分类

1.1.1 尾矿的分类及特点

选矿中分选作业的产物之一，其中有用目标组分含量最低的部分称为尾矿。在当前的技术经济条件下，已不宜再进一步分选。但随着生产科学技术的发展，有用目标组分还可能进一步回收利用的经济价值。尾矿并不是完全无用的废料，其往往含有可做其他用途的组分，可以综合利用；实现无废料排放，是矿产资源得到充分利用和保护生态环境的需要^[1]。

不同种类和不同结构构造的矿石，需要不同的选矿工艺流程，而不同的选矿工艺流程所产生的尾矿，在工艺性质上，尤其在颗粒形态和颗粒级配上往往存在一定的差异。按照选矿工艺流程，尾矿可分为手选尾矿、重选尾矿、磁选尾矿、浮选尾矿、化学选矿尾矿、电选尾矿及光电选尾矿等类型。还可按照尾矿中主要组成矿物的组合搭配情况分类。《尾矿库工程分析与设计》按照矿石来分类，见表 1-1。《尾矿设施设计参考资料》给出了选矿学常用的分类方法，见表 1-2、表 1-3。1986 年冶金工业部和中国有色金属工业总公司指定的《上游法尾矿堆积坝工程地质勘察规程》中采用冶金建筑研究总院建议的，以颗粒组成为依据，确定了尾矿分类的体系；该分类体系基本是按砾、砂、土三大类区分的，其分界粒径分别为 2mm、0.1mm，即粒径大于 2mm 者，称为尾矿砾石；粒径小于 2mm 且大于 0.1mm 者，称为尾矿砂；粒径小于 0.1mm 者，称为尾矿土。在尾矿土中又以黏粒组含量($<0.005\text{mm}$) 分别定名为尾粉砂、尾亚砂、尾轻亚黏、尾重亚黏、尾矿泥五种，见表 1-4；修正后的尾矿分类标准大体上可与当时新修订的地基规范中的土分类呈近似对照。

表 1-1 尾矿按矿石分类

类别	尾矿	一般特性
软岩尾矿	细煤废渣、钾、天然碱不溶物	包含砂和粉砂质矿泥，因粉砂质矿泥中黏土的存在，可能控制总体性质

续表

类别	尾矿	一般特性
硬岩尾矿	铅-锌、铜、金-银、钼、镍(硫化物)	可包含砂和粉砂质矿泥,但粉砂质矿泥常为低塑性或无塑性,砂通常控制总体性质
细尾矿	磷酸盐黏土、铝土矿红泥、铁细尾矿、沥青矿尾矿泥	一般很少或无砂粒级,尾矿的性态,特别是沉淀-固结特性受粉砂级或黏土级颗粒控制,可能造成排放容积问题
粗尾矿	沥青砂尾矿、铀尾矿、铁粗尾矿、磷酸盐矿、石膏尾矿	主要为砂或无塑性粉砂级颗粒,显示出似砂性及有利于工程的特性

表 1-2 尾矿按平均粒径 d_p 分类

分类	粗		中		细	
	极粗	粗	中粗	中细	细	极细
d_p/mm	>0.25	>0.074	$0.074\sim 0.037$	$0.037\sim 0.03$	$0.03\sim 0.019$	<0.019

表 1-3 尾矿按某粒级所占百分数分类

分类粒级/mm	粗		中		细	
	+0.074	-0.019	+0.074	-0.019	+0.074	-0.019
所占百分比/%	>40	>20	$20\sim 40$	$20\sim 50$	<20	>50

表 1-4 尾矿按颗粒组成分类

类别	判定标准	名称
尾矿砂	$>2.0\text{mm}$ 的颗粒占 $10\%\sim 50\%$	尾砾砂
	$>0.50\text{mm}$ 的颗粒占 $>50\%$	尾粗砂
	$>0.25\text{mm}$ 的颗粒占 $>50\%$	尾中砂
	$>0.10\text{mm}$ 的颗粒占 $>75\%$	尾细砂
尾矿土	$<0.005\text{mm}$ 的颗粒占 $>30\%$	尾矿泥
	$<0.005\text{mm}$ 的颗粒占 $15\%\sim 30\%$	尾重亚黏
	$<0.005\text{mm}$ 的颗粒占 $10\%\sim 15\%$	尾轻亚黏
	$<0.005\text{mm}$ 的颗粒占 $5\%\sim 10\%$	尾亚砂
	$<0.005\text{mm}$ 的颗粒占 $<5\%$	尾粉砂

《尾矿设施设计参考资料》给出了土力学常用的分类法(见表 1-5),中国最新版《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》(GB 50547—2010)规定,尾矿可根据其粒度组成和塑性指数按表 1-6 确定其类别和名称,尾矿的性状可根据其分类参照国家现行有关标准中相应土类的性状进行描述。

表 1-5 尾矿按塑性指数 I_p 分类

I_p	<1	$1\sim 7$	$7\sim 17$			>17
			$7\sim 10$	$10\sim 13$	$13\sim 17$	
土壤名称	砂土	砂壤土	轻壤土	中壤土 壤土	重壤土	黏土

表 1-6 尾矿按粒度组成和塑性指数分类

类别	名称	分类标准
砂性尾砂	尾砾砂	粒径大于 2mm 的颗粒质量占总质量的 25%~50%
	尾粗砂	粒径大于 0.5mm 的颗粒质量超过总质量的 50%
	尾中砂	粒径大于 0.25mm 的颗粒质量超过总质量的 50%
	尾细砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒质量超过总质量的 85%
	尾粉砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒质量超过总质量的 50%
粉性尾矿	尾粉土	粒径大于 0.075mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%，且塑性指数不大于 10
黏性尾矿	尾粉质黏土	塑性指数大于 10，且小于或等于 17
	尾黏土	塑性指数大于 17

注：1. 定名时应根据颗粒级配由大到小以最先符合者确定。

2. 塑性指数是表示细颗粒土塑性的参数，液限与塑限的差值称为塑性指数。

1.1.2 废石的分类及特点

目前关于矿山废石的统计和分类方式比较多，尚无明确的标准。有的是基于毒物危害的原则，或是根据形成条件，按矿物原料种类进行统计和分类；有的是根据废石利用的经济可行性，将废石作为生产社会有用产品的原料分阶段进行评价^[2]。下面介绍从经济角度对废石进行分类。回收或再回收有用组分的技术可能性首先决定于废石中有用组分的品位和最低可选品位。

$$\alpha_i - \alpha_{i0\sigma} \geq 0 \quad (1-1)$$

式中 α_i ——废石中有用组分的品位，%；

$\alpha_{i0\sigma}$ ——工业工艺可回收的有用组分最低品位，%。

其中 $\alpha_{i0\sigma}$ 值要结合考虑矿物原料加工工艺领域中世界各国最新成就来确定。同时，在预测的基础上还要注意其应用前景。在对废石分类时，首先从回收或再回收有用组分可能性的角度应分出：a. 当前可利用的；b. 在 10~20 年内准备利用，因而应保存的；c. 无利用价值的。

其次对无利用价值的废石应作为建筑工业的可能原料（生产黏合物、有孔黏土、碎石及其他材料）进行评价，在此之前必须研究这些废石的物理-力学及其他性质是否符合国家标准的要求。

此外，废石可用作井巷的固体充填料。

根据上述原则，将废石分为能用的和不能用的两类；最后在对废石利用按上述两个方面进行技术可能性评价之后，剩下的没有任何价值的废石可算作废物，这时需要进行废石堆和尾矿场用地的复田工作，或腾出它们占用的土地作农业生产用。在后一种情况下，可将废石放入地下巷道，或用其充填采空的露天矿场、沟谷和坳沟等。废石分类之后，下一个评价阶段应对废石加工的赢利性进行详细的技术性和经济性论证；同时，要考虑该种矿物原料在某地区的需求和消费量以及由于复田、腾出所占用农田所避免的社会经济损失的数额。废石用作建筑材料的经济合理性，是通过废石破碎、材料运到用户的费用同专门采场采出的非金属原料的勘探、开采、破碎、运输费用进行比较确定的。废石和尾矿场复田造林、开辟公园等

的合理性要结合考虑因避免环境污染所产生的不经济性。此外，还应注意附近是否有肥沃的、潜在肥沃的岩石和土壤的来源，以及运土石方法和生物方法复田的经济效益。在对废石堆放和腾出尾矿场占用耕地的具体方法选择进行论证时，应考虑该地区农业用地的保证程度。没有其他用处的废石（废物）可分为两类：可复田的和不适于复田的或应处理掉的。废石的分类见图 1-1。

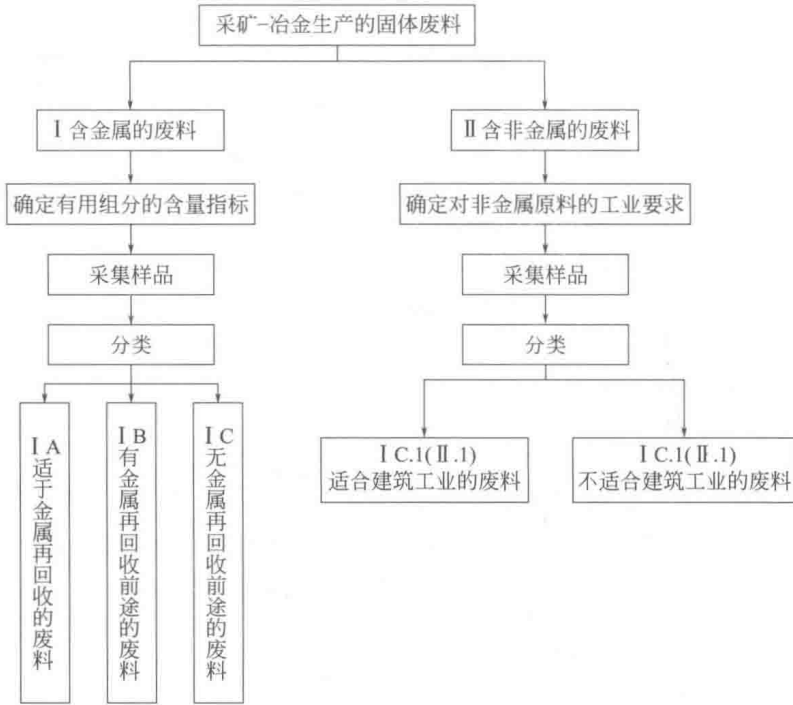


图 1-1 废石分类方法

1.2 我国尾矿和废石资源化利用概况

1.2.1 尾矿资源化利用概况

1.2.1.1 尾矿中金属再提炼

有色金属尾矿中大部分金属虽已经被提取，但是由于之前技术上的限制和成本的考虑，尾矿中往往还含有一定比例的有价金属，随着环境保护的要求日益提高和提炼技术的进一步发展，从尾矿中再提取金属是尾矿资源化利用的一个重要方向。

① 弓长岭选矿厂铁浮选尾矿利用悬振选矿机再选，在铁品位为 23.34% 的给矿条件下，经 0.074mm 分级，细粒级部分一次悬振选别可获得品位 64.35%、回收率 30.93% 的铁精矿，粗粒级通过磨矿后（磨矿细度 0.074mm85%）再悬振分选，获得的精矿铁品位为 59.93%、回收率 9.80%，综合精矿铁品位为 63.22%、回收率 40.73%，综合尾矿铁品位 12.58%。悬振选矿机作为绿色、高效微细粒级尾矿回收设备，为弓长岭选矿厂的铁浮选尾矿回收与再利用提供可选矿方案，其社会效益及经济效益显著^[3]。

② 云南大红山铁尾矿，矿物粒度细、铁品位低，铁矿物主要为赤铁矿。采用传统的选矿工艺难以得到有效回收。朱运凡等采用强磁预选抛尾和悬振锥面选矿机精选的磁选-重选

联合工艺,有效地回收尾矿中的铁矿物,最终尾矿铁品位降至 10.45%,产出的铁精矿品位达到 54.02%,回收率为 34.68%^[4]。

③ 鞍山地区铁矿资源量丰富,开采历史悠久,现在的尾矿累计堆存量已达到 6.0×10^8 t 以上,目前每年尾矿排放量仍接近 4.0×10^7 t。尾矿分为赤铁矿和磁铁矿两大类。对大孤山磁选厂采用盘式磁选机粗选,粗精矿再磨后经脱水槽、磁选机、细筛再选,每年可回收品位在 60% 左右铁精矿 8×10^4 t。本钢歪头山铁矿选矿厂为充分利用资源,在尾矿流槽中安装 1 台盘式磁选机,直接从选矿厂尾矿中回收粗精矿,尾矿品位降低 0.56%,回收粗精矿产率 2.46%,可实现年产值 588 万元。首钢水厂铁矿地处河北迁安境内,铁矿年产矿石 1.1×10^7 t;大石河铁矿,年产矿石 8.0×10^6 t。水厂和大石河尾矿库共堆存了约 2.2×10^8 t、TFe 品位在 10% 左右的尾砂。如果尾矿库中尾矿全部再选回收利用,预计可回收铁金属量 6.6×10^6 t,相当于生产品位 66% 的铁精矿 1.0×10^7 t。水厂铁选厂尾矿高效回收新工艺共投资 765 万元,实际精矿单位生产成本为 86.30 元/t。选厂每年处理原矿 1.1×10^7 t、尾矿量 7.87×10^6 t,尾矿经过再选后,将生产出品位 66.95% 的铁精矿 2.88×10^5 t,回收金属量 1.928×10^5 t,800 元/t(11 月迁安价)计价值 2.3 亿元。按原矿品位 25% 计算,年回收铁折合原矿量 7.7×10^5 t,每年少排尾矿量 2.88×10^5 t,每年减少占用尾矿库库容 9.0×10^4 m³ 左右,环境效益明显,且尾矿再选生产成本低于原矿生产成本,是磁铁尾矿回收的范例^[5]。

④ 山东焦家金矿选厂尾矿中富含长石和一定量的铁、硫,邵广全对该矿的尾矿进行一系列的试验研究,采用“螺旋溜槽分级-螺旋溜槽中强磁除铁-长石反浮选脱硫”工艺,以 BK-413 和丁基黄药为捕收剂,得到 34.76% 的长石粉以及产率 0.13%、含金 23.08g/t 的金精矿^[6]。

⑤ 许世伟等^[7]对内蒙古包头市泉山金矿尾矿采用“微生物氧化预处理-硫脲法”综合回收尾矿中的金。尾矿经氧化亚铁硫杆菌预处理 5d,预处理过程中采用 90W 功率的超声波强化预处理效果,之后将预处理过的尾矿进行硫脲法浸金,其中液固比为 2:1、浸出温度为 25℃、pH 值为 2、硫脲浓度为 15g/L,浸出时间为 60min,最终浸出率可达 60% 以上。

1.2.1.2 尾矿制备建筑材料

我国尾矿资源粒度小,大部分选矿排出和堆存的尾矿颗粒较小,尾矿中化学成分和建筑材料相近,都是碳酸盐、硅酸盐矿物及黏土等成分组成的,因此尾矿应用于建筑材料也有其先天优势^[8~10]。尾矿制备建筑材料的具体技术应用主要分为以下几个方面。

(1) 尾矿制作建筑用砖

尾矿制作建筑用砖,相关研究和应用已经证明利用尾矿制砖不仅在技术上而且在经济上也是可行的,尾矿作为一种废弃资源用于制砖可以大大替代传统制砖消耗大量的黏土,减少对环境和耕地的破坏,具有很好的经济效益和环境效益。我国已经通过制定法规来限制生产实心黏土砖,同时在尾矿制砖上进行了研究应用,取得了良好效果,可以生产不同类型不同用途的建筑用砖,产品更加多样化,技术更加先进化。例如,马鞍山矿山研究院采用齐大山、歪头山的尾矿成功地制成了免烧砖。焦家金矿已引进国家“双免”砖生产技术,每年消耗尾矿 6.0×10^4 t,取得了很好的经济效益。

(2) 用作公路路基材料

用作公路路基材料。公路路基铺料对化学成分要求较低,要求材料的强度和硬度,尾矿作为强度较高的固体颗粒比较适合,一方面将尾矿应用于铺路无需太多的深加工,降低了经

济成本,也减轻了环境压力;另一方面,大量使用尾矿作为材料,可以减少尾矿堆放的压力。上海梅山铁矿、江苏吉山铁矿、首钢大石河铁矿等一些矿山把选矿过程中抛出的废石、磁选过程中产生的尾矿直接作为建材产品并且利用自身选矿工艺,结合当地实际情况,也取得一定经济效益和环境效益。

(3) 尾矿制备生产水泥和混凝土

尾矿制备生产水泥和混凝土。尾矿中的某些微量元素影响熟料的形成和矿物的组成,从而提高水泥质量。国内外目前应用于制备水泥的主要是铅锌尾矿和铜尾矿,尾矿可用于替代原料,其中含有的微量元素还可以起到特殊作用,有效地提高质量和能耗。例如,凡口铅锌矿利用含方解石、石灰石为主的尾矿生产水泥,年生产水泥 1.5×10^5 t,其标号达到600号。杭州市钼铁矿研究用钼铁尾矿代替部分水泥原料烧制水泥的生产技术,并成功验收,收到了明显的经济效益。另外,根据不同要求,尾矿颗粒可以不需要加工而作集料使用,提高混凝土的耐久性和强度。

(4) 尾矿用来制玻璃、微晶玻璃及陶瓷

国内利用尾矿制取微晶玻璃、陶瓷等的研究很早就开始了,制备出的玻璃和陶瓷可供地面、墙面装饰之用,陶瓷可代替天然花岗岩作高级装饰材料。同济大学与上海玻璃器皿二厂合作,以安徽琅琊山铜矿尾矿为原料,已研制出可代替大理石、花岗岩和陶瓷面砖等具有高强、耐磨和耐蚀的铜尾矿微晶玻璃。大厂铅锌尾矿中含硅80%以上,并含有一定数量的钾长石和钠长石,多年来一直是株洲玻璃厂生产平板玻璃、压花玻璃和玻璃球的重要原料之一。中国地质科学院研究采用尾矿砂烧出工业陶瓷和日用陶瓷,品质优良,符合国家相关质量标准 and 环保要求,已投入批量生产。

1.2.2 废石资源化利用概况

1.2.2.1 废石提取有价值成分

江西德兴铜矿是我国最大的露采斑岩铜矿,含铜低于0.3%的矿石作为废石丢弃,废石中含铜0.25%~0.3%的矿石约占总储量的20%。为了回收这部分资源,德兴铜矿采用堆浸—萃取—电积工艺提取废石中的铜,已建成年产商品铜1000t的湿法冶铜厂。该矿10多年来已处理含铜品位0.25%~0.3%的矿石5500多万吨,回收铜 1.47×10^5 t,黄金11.6t,取得了较好的经济效益。

紫金山金矿1年采剥废石量 1.5×10^7 m³以上,为充分利用资源,紫金矿业启动了固体废物(含金0.3~0.7g/t)二次资源化综合利用工程,对含金0.2~0.3g/t低品位废石采用“挑块品位分级法”回收资源,实现了低品位矿石的回收利用,为企业创造了新的经济效益。

1.2.2.2 生产建筑材料

铁矿区多数围岩具有力学性能稳定、强度高的特点,因此在后续开发中所生产的岩石能够广泛用于道路、厂房、铁路等工程建设,可以满足市场需求。尤其是对于矿区周围是平原、丘陵的地区,由于建筑石材来源缺乏,矿区生产的石材具有广泛的市场需求前景^[11]。

参考文献

[1] 王峰举.我国有色金属尾矿资源化利用现状与趋势[J].有色金属文摘,2015,(05):26-27.

- [2] 焦明富, 姚红, 薛红梅. 试论矿山废石的分类及其综合利用 [J]. 新疆有色金属, 2007, 30, (2): 8-9.
- [3] 李小娜. 悬振选矿机在弓长岭选矿厂铁尾矿再选中的应用 [J]. 矿产综合利用, 2016, (03): 80-82.
- [4] 朱运凡, 杨波, 卢琳. 云南大红山铁尾矿再选新工艺研究 [J]. 矿冶, 2012, (01): 35-38.
- [5] 秦煜民. 磁选尾矿铁资源回收利用现状与前景 [J]. 中国矿业, 2010, (05): 47-49.
- [6] 邵广全. 焦家金矿选矿厂尾矿综合利用选矿工艺研究 [J]. 国外金属矿选矿, 2006, (07): 41-43.
- [7] 许世伟. 用微生物氧化预处理-硫脲法综合回收金尾矿中金的研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [8] 邓湘湘. 我国有色金属矿山固体废物利用现状与研究 [J]. 湖南有色金属, 2011, (05): 75-77.
- [9] 李颖, 张锦瑞, 赵礼兵, 等. 我国有色金属尾矿的资源化利用研究现状 [J]. 河北联合大学学报 (自然科学版), 2014, (01): 5-8.
- [10] 王峰举. 我国有色金属尾矿资源化利用现状与趋势 [J]. 有色金属文摘, 2015, (05): 26-27.
- [11] 孙超铨. 废石利用的新途径 [J]. 采矿技术, 2005, 5 (1): 11-12.

第2章



尾矿和废石基本特性

2.1 尾矿物理、化学性质

矿山尾矿是矿石选矿过程中的排放废料，是金属矿产资源开发利用过程中排放的主要固体废料，具有量大、集中、颗粒细小的特点，往往占采出矿石量的40%~99%。依据《土的分类标准》(GBJ 145—90)规定的土颗粒粒径范围划分，尾矿的物理形态和砂土类似，主要的物理化学性质有相对密度和容重、孔隙率和孔隙比、颗粒级配、化学成分等。

2.1.1 尾矿基本物理性质

2.1.1.1 相对密度

相对密度的定义为：尾矿在105~110℃下烘干至恒重时的质量与尾矿同体积4℃纯水质量的比值，无量纲。尾矿的粒径普遍小于5mm，采用比重瓶法进行测定。

容重(最小干密度)是处于松散状态的尾矿单位体积所具有的质量，单位为 g/cm^3 。

相对密度试验参照《土工试验规程》(SL 237-005-1999)^[1]，采用比重瓶法测定，步骤如下。

1) 将干尾矿约12g，用漏斗装入烘干了的比重瓶内并称其质量，得瓶加砂的质量 m_1 ，准确至0.001g。

2) 将已装入干尾矿的比重瓶注纯水至瓶的1/2处。摇动比重瓶，使尾砂初步分散，然后将比重瓶放在电热砂浴上煮沸排气，煮沸时间从开始沸腾时算起不小于30min。亦可用真空抽气法排气，时间不少于1h。

3) 将蒸馏水注满经排气后装有试样的比重瓶，然后放比重瓶于恒温水槽内，待瓶内悬液温度稳定后(与恒温水槽内的水温相同)，测记水温(T)，准确至0.5℃。取出比重瓶，擦干比重瓶外部水分，称瓶加水加砂的总质量(m_4)，准确至0.001g。

4) 根据测得的温度，从已绘制的温度与瓶、水总质量关系曲线中查得瓶水总质量(m_3)。按下式计算相对密度：

$$d_s = \frac{m_0}{m_0 + m_3 - m_4} \cdot G_{iT} \quad (2-1)$$